9-ДӘРІС
WIDROW-HOFF ОҚЫТУЫ

Дәрістің мақсаты

Студенттерде ADALINE (ADAptive Linear NEuron) сызықтық нейрондық желісінің архитектурасы, орташа квадраттық қате (MSE) өнімділік функциясының қасиеттері, кіріс корреляциялық матрицасының оңтайлы шешімге тигізетін әсері, сондай-ақ Widrow-Hoff (LMS — Least Mean Square) оқыту алгоритмі мен оны адаптивті сигналдарды сүзгілеуде қолдану туралы жүйелі білім қалыптастыру.

Оқу нәтижелері. Дәрісті меңгеру нәтижесінде студенттер:

- **Ажырата алады:** Классикалық перцептрон мен ADALINE желісінің құрылымдық және функционалдық айырмашылықтарын (белсендіру функциясы, шуға төзімділік, шешім шекарасының орналасуы).
- **Түсінеді:** Орташа квадраттық қате (MSE) функциясының квадраттық сипатын, кіріс корреляциялық матрицасының (R) меншікті мәндері мен бірегей жаһандық минимумның бар-жоғы арасындағы байланысты.
- **Қолдана алады:** LMS (Widrow-Hoff) алгоритмінің салмақтар мен ығысуды жаңарту формулаларын үлгілерді тану және адаптивті сүзгілеу (шу мен жаңғырықты басу) есептерінде қолдана алады.

- Алдыңғы дәрістерде біз өнімділікті үйренудің негізін қаладық, онда желі өнімділігін оңтайландыруға үйретіледі. Бұл дәрісте біз бір деңгейлі сызықтық нейрондық желіге өнімділікті үйрену принциптерін қолданамыз.
- Widrow-Hoff оқытуы - өнімділік индексі орташа квадраттық қате болып табылатын шамамен ең тік төмендеу алгоритмі. Бұл алгоритм екі себеп бойынша біздің талқылауымыз үшін маңызды. Біріншіден, ол бүгінде көптеген сигналдарды өңдеу қолданбаларында кеңінен қолданылады, олардың кейбірін осы тарауда қарастырамыз. Сонымен қатар, ол келесі дәрісте берілетін көпқабатты желілер үшін кері таралу алгоритмінің алғышарты болып табылады.

- Бернард Видроу 1950 жылдардың аяғында, Фрэнк Розенблатт перцептронды оқыту ережесін жасаған кезде нейрондық желілерде жұмыс істей бастады. 1960 жылы Уидроу және оның аспиранты Марсиан Хофф ADALINE (ADAptive Linear NEuron) желісін және олар LMS (Ең кіші орташа квадрат) алгоритмі [WiHo60] деп атаған үйрену ережесін ұсынды. Олардың ADALINE желісі перцептронға өте ұқсас, тек оның активациялық функциясы қатаң шектеудің орнына сызықты. ADALINE да, перцептрон да бірдей табиғи шектеуден зардап шегеді: олар тек сызықты түрде бөлінетін есептерді шеше алады. Алайда LMS алгоритмі перцептронды оқыту ережесіне қарағанда күштірек. Перцептрон ережесі жаттығу үлгілерін дұрыс санаттайтын люцияға жақындауға кепілдік берілгенімен, нәтижесінде алынған желілік жұмыс шуға сезімтал болуы мүмкін, өйткені үлгілер жиі шешім шекараларына жақын орналасады. LMS алгоритмі орташа квадраттық қатені азайтады, сондықтан шешім шекараларын оқыту үлгілерінен мүмкіндігінше алыс жылжытуға тырысады.

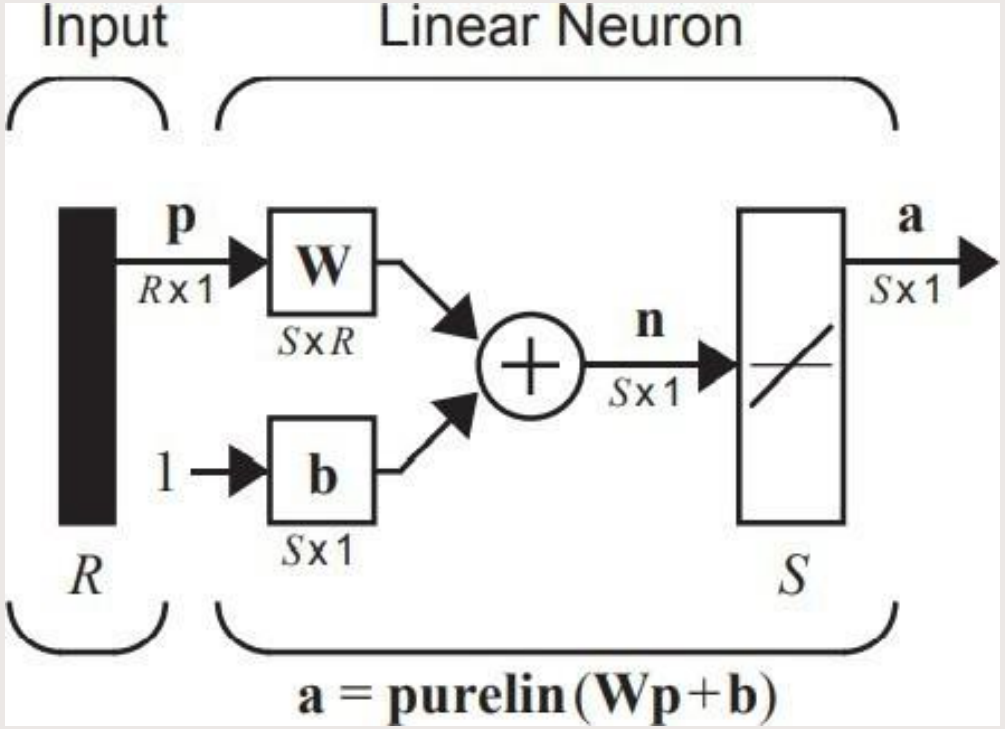
ADALINE желісі және оның перцептроннан айырмашылығы

- **Тарихи шолу:** 1960 жылы Бернард Видроу мен Марсиан Хофф ұсынған ADALINE (*ADAptive Linear NEuron*) желісі құрылымы жағынан перцептронға ұқсас, алайда онда шектік (hardlim) функцияның орнына **сызықтық (purelin)** белсендіру функциясы қолданылады: a = Wp + b.

- **Шешім шекарасы мен шуға төзімділік:** Перцептрон сияқты ADALINE де тек сызықтық бөлінетін есептерді шеше алады. Бірақ перцептрон ережесі жаттығу үлгілерін дұрыс жіктейтін кез келген шекараны тауып тоқтаса, LMS алгоритмі орташа квадраттық қатені минимизациялау арқылы шешім шекарасын оқыту үлгілерінен мүмкіндігінше алшақ орналастырады. Бұл желінің шуға төзімділігін едәуір арттырады.

- LMS алгоритмі перцептронды оқыту ережесіне қарағанда көптеген практикалық қолдануларды тапты. Бұл, әсіресе, цифрлық сигналды өңдеу саласына қатысты. Мысалы, қалааралық телефон желілерінің көпшілігі жаңғырықты жою үшін ADALINE желілерін пайдаланады. Бұл қолданбаларды кейінірек тарауда егжей-тегжейлі қарастырамыз.
- LMS алгоритмінің сигналдарды өңдеу қосымшаларында үлкен табысқа жетуіне байланысты және алгоритмді көпқабатты желілерге бейімдеуде сәттіліктің болмауына байланысты Уидроу 1960 жылдардың басында нейрондық желілердегі жұмысын тоқтатты және адаптивті сигналда толық уақытты жұмыс істей бастады. өңдеу. Ол 1980-жылдары нейрондық желі саласына оралды және өзінің бастапқы LMS алгоритмінің ұрпағы болып табылатын уақытша кері таралуды пайдалана отырып, нейрондық желілерді адаптивті басқаруда пайдалану бойынша зерттеулерді бастады.

ADALINE NETWORK



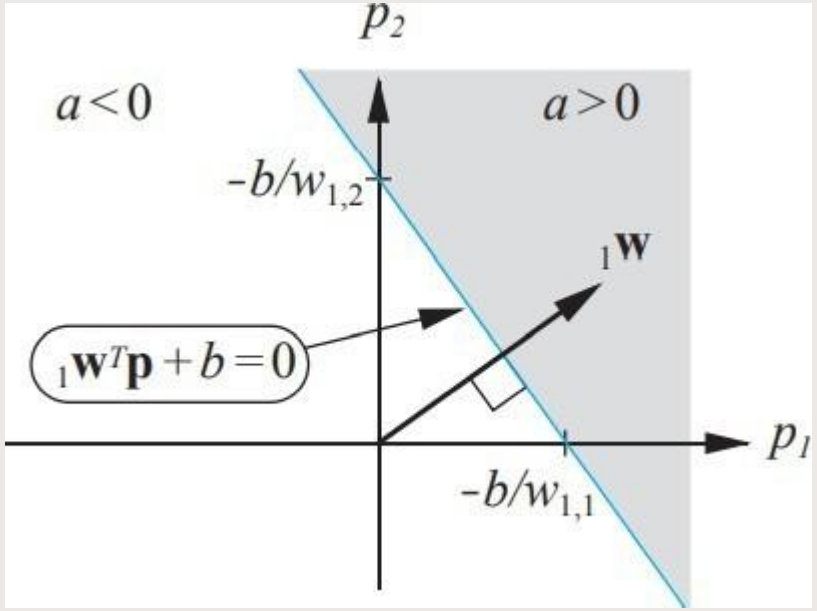
$$\mathbf{a} = \mathbf{purelin}(\mathbf{Wp} + \mathbf{b}) = \mathbf{Wp} + \mathbf{b}.$$

$$a_i = purelin(n_i) = purelin({}_i\mathbf{w}^T\mathbf{p} + b_i) = {}_i\mathbf{w}^T\mathbf{p} + b_i,$$

$${}_i\mathbf{w} = \begin{bmatrix} w_{i,1} \\ w_{i,2} \\ \vdots \\ w_{i,R} \end{bmatrix}.$$

Нейронның шығуы сұр аймақта 0-ден жоғары. Ақ аймақта шығыс нөлден аз. Енді бұл ADALINE туралы нені білдіреді? Онда ADALINE нысандарды екі санатқа жіктеу үшін пайдалануға болады деген сөз бе?

Дегенмен, ол объектілер сызықты түрде бөлінетін болса ғана қолдана аламыз. Осылайша, бұл жағынан ADALINE перцептронмен бірдей шектеуге ие.



Адаптивті сүзгілеу (Adaptive Filtering)

- **Цифрлық сигналдарды өңдеудегі рөлі:** Кешіктіру элементтері бар (Tapped Delay Line) ADALINE желісі цифрлық сигналдарды өңдеудегі ақырғы импульстік сипаттамалы (**FIR**) адаптивті сүзгінің негізі болып табылады.

- **Практикалық қолданылуы:** Нақты уақыт режимінде сигнал сипаттамалары өзгергенде LMS алгоритмі сүзгі коэффициенттерін бейімдеп отырады. Бұл телефон желілеріндегі жаңғырықты жоюда (echo cancellation), аудио және биомедициналық сигналдарды шудан тазартуда (noise cancellation) және телекоммуникациялық арналарды теңестіруде (equalization) кеңінен қолданылады.

Қорытынды

Бұл дәрісте бір қабатты сызықтық ADALINE желісі мен оны оқытуға арналған Widrow-Hoff (LMS) алгоритмі жан-жақты қарастырылды. Орташа квадраттық қатені лездік қате квадратымен алмастыру арқылы градиентті жуықтап есептеу идеясы есептеу жағынан өте тиімді әрі қарапайым оқыту ережесін құруға мүмкіндік берді.

ADALINE желісі де перцептрон сияқты сызықтық бөлінетін есептермен шектелгенімен, LMS алгоритмінің шуға төзімділігі және нақты уақытта бейімделу қабілеті оны цифрлық сигналдарды өңдеу мен адаптивті сүзгілеудегі ең танымал құралға айналдырды. Сонымен қатар бұл алгоритм келесі дәрісте қарастырылатын көпқабатты нейрондық желілерге арналған **қатені кері тарату (Backpropagation)** алгоритмінің тікелей ізашары болып табылады.

Өзін-өзі бағалау сұрақтары

1. **ADALINE және перцептрон:** ADALINE желісінің классикалық перцептроннан басты құрылымдық айырмашылығы неде? Олардың шешім қабылдау шекаралары шуға төзімділік тұрғысынан қалай ерекшеленеді?

2. **Орташа квадраттық қате:** ADALINE желісінің өнімділік функциясы \(F(x) = E[e^2]\) қандай түрде жазылады? Ондағы R корреляциялық матрицасы мен h өзара корреляция векторы нені білдіреді?

3. **Бірегей минимум шарты:** Қандай математикалық шарт орындалғанда орташа квадраттық қате функциясының жалғыз *бірегей глобальды минимумы* болады? Ол минимум қандай формуламен есептеледі?

4. **LMS алгоритмінің мәні:** Widrow-Hoff алгоритмінде нақты градиенттің орнына неліктен жуықталған градиент қолданылады? Салмақ матрицасы мен ығысуды жаңарту формулаларын жазыңыз.

5. **Оқыту жылдамдығы (α):** LMS алгоритмінің жинақталуын қамтамасыз ету үшін α оқыту жылдамдығы қандай аралықта таңдалуы керек?

Әдебиеттер тізімі

1. **Хейган М. Т., Демут Х. Б., Бил М. Х., Де Хесус О.** Нейронные сети. Дизайн и применение (Neural Network Design). — М.: ДМК Пресс, 2021. — 800 с. *(10-тарау: «Обучение по методу Уидроу–Хоффа» — ADALINE желісі, MSE өнімділік беті, LMS алгоритмі және адаптивті сүзгілеу).*

2. **Хайкин С.** Нейронные сети: полный курс. — 2-е изд. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2018. — 1104 с. *(Фильтр Винера и алгоритм наименьших квадратов LMS).*

3. **Уидроу Б., Стирнз С.** Адаптивная обработка сигналов. — М.: Радио и связь, 1989. — 440 с. *(ADALINE архитектурасы, LMS алгоритмі және жаңғырық пен шуды басу жүйелері).*

4. **Осовский С.** Нейронные сети для обработки информации. — М.: Финансы и статистика, 2017. — 448 с. *(Адалайн желілері және Видроу-Хофф оқыту ережесі).*

5. **Бейсембекова Р. Н., Әбдірахманова Ж. Б.** Жасанды интеллект және нейрондық желілер негіздері: Оқу құралы. — Алматы: Қазақ университеті, 2021. — 184 б. *(Қазақ тіліндегі адаптивті нейрондық модельдер мен оқыту алгоритмдері).*